

Ćwiczenie C2

Tranzystory

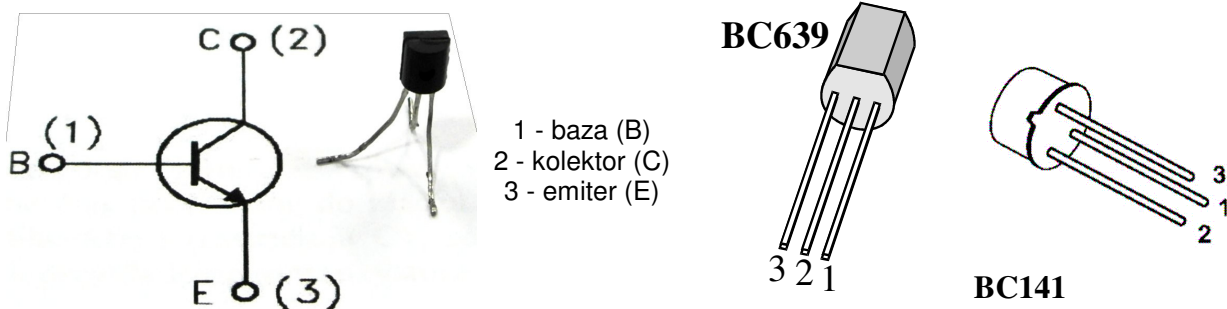
Streszczenie

W tym ćwiczeniu poznajemy podstawowe własności tranzystora czyli podstawowego elementu wzmacniającego sygnały elektroniczne. Rozpocznemy od zbadania charakterystyki wyjściowej tranzystora bipolarnego $I_C(U_{CE})$ - czyli zależności prądu kolektora, I_C , od napięcia kolektor-emiter, U_{CE} oraz wyznaczmy współczynnik wzmacnienia prądowego, β . Charakterystyki $I_C(U_{CE})$ dla różnych prądów bazy I_B (i różnych napięć baza-emiter U_{BE}) otrzymamy na ekranie oscyloskopu w modzie wyświetlania XY. Na ich podstawie zostaną ustalone warunki optymalnej pracy wzmacniacza tranzystorowego (optymalny punkt pracy wzmacniacza), czyli optymalny prąd kolektora dla wzmacniacza. Następnie zostanie zbudowany wzmacniacz tranzystorowy i zmierzmy jego wzmacnienie napięciowe.

Wstęp

Tranzystor to trójelektrodowy element elektroniczny umożliwiający wzmacnianie lub przełączanie sygnałów elektrycznych. Od jego wynalezienia w roku 1948 rozpoczęła się era elektroniki półprzewodnikowej, w tym masowego przetwarzania informacji z wykorzystaniem układów scalonych, projektowanych do realizacji złożonych funkcji w obwodach elektronicznych i budowanych w oparciu o tranzystory. Duże układy scalone zawierają nawet biliony tranzystorów (np. 128-layer 1.33 Tb QLC 3D NAND flash memory chip).

Działanie tranzystora będziemy badać na przykładzie popularnego tranzystora bipolarnego npn typu BC141, BC635 lub BC639. Są to tranzystor średniej mocy (dopuszczalna moc $U_{CE} \cdot I_C \leq 1$ W) o dopuszczalnym prądzie kolektora $I_{Cmax} = 1$ A oraz o dopuszczalnym napięciu kolektor-emiter $U_{CEmax} = 60$ V (BC639 - 80V) i granicznej częstotliwości pracy 100 MHz (BC141 - 50 MHz).



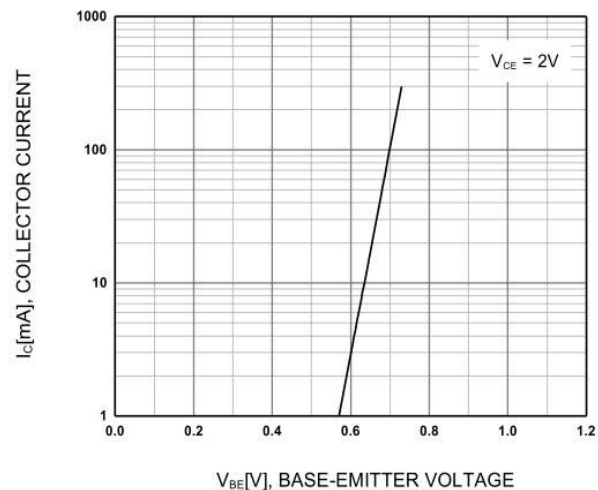
Rys. 1. Schemat elektryczny tranzystora npn oraz widok obudowy tranzystorów z oznaczeniem wprowadzeń. W obudowie tranzystora istnieje znacznik przy elektrodzie E.

Działanie tranzystora bipolarnego (omówione tu na przykładzie npn) opiera się na dwu sąsiadujących ze sobą złączach p-n, baza-emiter (B-E) i baza-kolektor (B-C), przy czym złącze B-E jest podłączane w kierunku przewodzenia, a złącze B-C w kierunku zaporowym. Zasadniczą cechą budowy tranzystora bipolarnego, która umożliwi działanie wzmacniające i przełączające tranzystora, jest niewielka grubość obszaru bazy (typu p w tranzystorze npn), na tyle mała, aby strumień elektronów, który będzie płynąć w złączu B-E wywołany napięciem U_{BE} przekraczającym napięcie przewodzenia złącza p-n, zdołał być wstrzykiwany do obszaru kolektora typu n, czyli aby elektrony wstrzykiwane z obszaru emitera do obszaru bazy nie rekombinowały z dziurami w bazie, a płynęły dalej do obszaru kolektora. W ten sposób niewielkie zmiany napięcia baza-emiter, U_{BE} , wywołają duże zmiany prądu kolektor-emiter C-E. W obszarze bazy elektrony wstrzykiwane z emitera są nośnikami mniejszościowymi, zatem mogą “żyć” w obszarze bazy przez czasy rzędu dziesiątek lub setek nanosekund. Baza geometrycznie musi być na tyle cienka, aby większość elektronów wstrzykiwanych z emitera docierała do kolektora. Jedynie niewielka część elektronów wstrzykiwanych z emitera (czyli tworzących prąd emitera I_E) rekombinuje w bazie i tworzy prąd bazy I_B , pozostała część dociera do obszaru kolektora i tworzy prąd kolektora I_C . Dla tranzystora spełnione są relacje:

$$I_C = \beta I_B \quad \text{oraz} \quad I_E = I_C + I_B \quad (1)$$

gdzie β nosi nazwę współczynnika wzmocnienia prądowego tranzystora, który jest zdefiniowany jako I_C / I_B i określa jaka część prądu kolektora (i w przybliżeniu emitera) tworzy prąd bazy. Zwykle wartość $\beta = 10 - 1000$, jest to współczynnik w przybliżeniu stały dla danego tranzystora (ale spada przy wzroście częstotliwości oraz przy dużych prądach kolektora). W przypadku badanych przez nas tranzystorów BC141, BC635 lub BC639 współczynnik β będzie wynosił około 100 - 200.

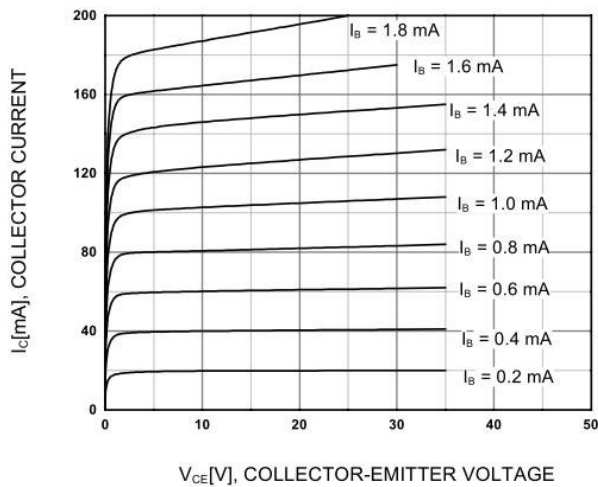
Rys. 2. Zależność prądu kolektora I_C od napięcia złącza pn baza-emiter U_{BE} dla przykładowego tranzystora npn typu BC635.



W tranzystorze prąd emitera I_E , równy w przybliżeniu prądowi kolektora I_C , jest wyznaczony przez napięcie U_{BE} przyłożone do złącza B-E, zgodnie z zależnością I-V dla złącza p-n opisaną równaniem Shockleya (instrukcja C1, równanie (1)) Obrazuje to rys. 2 pochodzący z danych katalogowych przykładowego tranzystora npn typu BC635.

Gdy zwiększamy napięcie U_{BE} , czyli także prąd bazy I_B , prąd kolektora I_C wzrasta proporcjonalnie do prądu bazy I_B - wzór (1). Czyli zmieniając niewielki prąd bazy proporcjonalnie zmieniamy znacznie większy prąd kolektora. Jak widać tranzystor wzmacnia prąd. Wykorzystując tę cechę buduje się układy wzmacniaczy z tranzystorem, w których uzyskuje

się również wzmożenie napięcia. Efektywnie układ wzmacniacza daje wzmożenie mocy - małe zmiany mocy w obwodzie wejściowym bazy wywołują duże zmiany mocy w obwodzie wyjściowym kolektora.



Rys. 3. Zależność prądu kolektora I_C od napięcia kolektor-emiter U_{CE} dla różnych wartości prądu bazy dla tranzystora npn BC635.

Dla ustalonego prądu bazy (także napięcia U_{BE}), prąd kolektora I_C , czyli prąd płynący między emiterem i kolektorem, jest w szerokim zakresie napięć kolektor-emiter U_{CE} w przybliżeniu niezależny (dla niewielkich prądów kolektora) od napięcia U_{CE} - rys. 3. Tranzystor może więc działać jak źródło prądowe - prąd kolektora I_C nie zależy (w przybliżeniu małych prądów I_C) od napięcia $U_{CE} > 1$ V. Wykresy przedstawione na rys. 3, czyli zależności I_C od U_{CE} dla ustalonego I_B (a więc i ustalonego U_{BE}), noszą nazwę charakterystyk wyjściowych tranzystora.

Badanie tranzystora w tym ćwiczeniu zaczniemy od wyznaczenia podobnych charakterystyk do pokazanych na rys. 2 i 3 oraz wyznaczenia współczynnika wzmożenia prądowego β dla tranzystora BC141 lub BC639. Taki tranzystor będzie następnie użyty do zbudowania wzmacniacza.

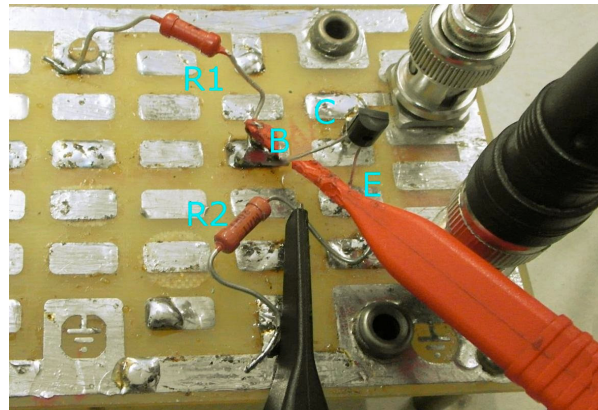
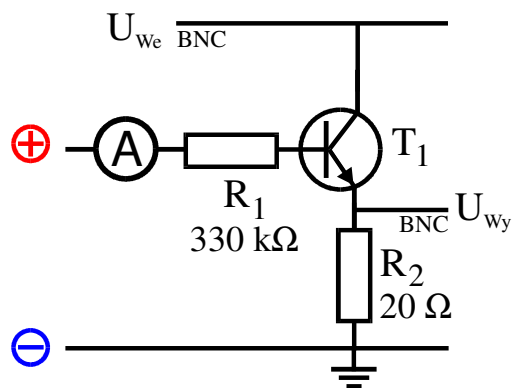
Wzmacniacz tranzystorowy (o wspólnym emiterze) dla prądów zmiennych uzyskuje się przykładając do bazy napięcie zmienne, dodatkowo oprócz napięcia stałego. Napięcia stałe stosuje się dla ustawienia wstępnych warunków pracy tranzystora, czyli w szczególności wartości prądu stałego kolektora oraz napięcia stałego na kolektorze. Ustalenie tych warunków napięć i prądów stałych nosi nazwę wyboru optymalnego punktu pracy wzmacniacza tranzystorowego. We wzmacniaczach w obwodzie kolektora stosowany jest opornik ograniczający prąd kolektora do wartości bezpiecznych dla tranzystora (ograniczający też moc pracy tranzystora poniżej dopuszczalnej dla danego typu tranzystora). Optymalny punkt pracy tranzystora we wzmacniaczu jest wyznaczony przez taki prąd kolektora, przy którym na kolektorze panuje napięcie równe połowie napięcia zasilania. Wtedy napięcie zmienne na kolektorze może wahać się od napięcia bliskiego 0, do napięcia bliskiego napięcia zasilania przy zachowaniu kształtu napięcia zmiennego podawanego do bazy. Można wtedy uzyskać największe wzmożenie mocy sygnału (przy zachowaniu niezmiennego kształtu sygnału wyjściowego takiego jak sygnał wejściowy np. sinusoidalny, czyli bez wprowadzania zniekształceń sygnału wzmacnianego).

Aparatura do wykonania ćwiczenia

Płytką drukowaną z dwoma gniazdami BNC, tranzystor BC141, oporniki 330 k Ω , 200 k Ω , 1,5 k Ω , 20 Ω , potencjometr 1 M Ω , kondensatory 47 nF i 1 μ F. Dwa mierniki uniwersalne, generator funkcyjny, oscyloskop 2 kanałowy, akcesoria pomocnicze (lutownica elektroniczna, kable łączeniowe, chwytaki pomiarowe, trójnik rozgałęziający BNC).

Wykonanie ćwiczenia

Część pierwsza - pomiar charakterystyk tranzystora.



Rys. 4. Schemat i zdjęcie układu do pomiaru w funkcji napięcia U_{CE} . Opornik R_2 w obwodzie emitera pełni rolę czujnika prądu emitera (mierzone napięcie na R_2 jest proporcjonalne do prądu $I_E \approx I_C$).

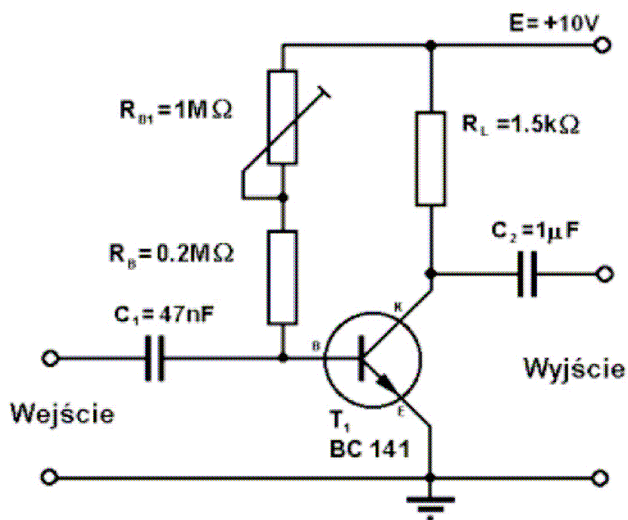
- 1) Zbudować układ pomiarowy według schematu z rys. 4. Do zasilania układu (kolektor tranzystora) wykorzystamy generator funkcyjny, podłączony jednocześnie do kanału CH1 oscyloskopu, a sygnał wyjściowy należy podłączyć do kanału CH2. Napięcie obwodu bazy, U_b , podajemy z zasilacza regulowanego napięcia stałego. Jako amperomierz stosujemy miernik uniwersalny ustawiony na zakres mikroamperów.
- 2) Generator skonfigurować tak, by generował przebieg piłokształtny o częstotliwości około 100 Hz i o napięciu zmieniającym się od 0 do 10 V.
- 3) Oscyloskop skonfigurować do pracy w trybie XY (przycisk Display --> XY). Oscyloskop powinien kanał CH1 wyświetlać jako X (oś pozioma), a kanał CH2 jako Y (oś pionowa). Jeżeli oscyloskop inaczej przyporządkowuje kanały, to należy zamienić kable. W ten sposób sygnał na osi poziomej będzie proporcjonalny do napięcia U_{CE} (napięcie na oporniku R_2 zaniehbujemy, bo jest małe. Natomiast sygnał na osi pionowej będzie proporcjonalny do prądów kolektora i emitera $I_C \approx I_E = U_{wy}/R_2$).
- 4) Wzmocnienie kanału CH1 i położenie wykresu w poziomie ustawić tak, aby na ekranie mieścił się cały zakres napięcia piłokształtnego 0 - 10 V. Czułość w kanale CH2 (oś pionowa) najwygodniej jest ustawić na 20 mV (lub 50 mV) na działkę, wtedy dla opornika w obwodzie emitera o wartości 20 Ω jedna działka skali ekranu odpowiada prądowi emitera o wartości 1 mA (lub 2.5 mA). Przesunąć wykres w pionie tak, by dla prądu $I_C = 0$ mA wykres pokrywał się z najniższą kratką podziałki ekranu oscyloskopu.

Zaobserwować powstające na ekranie oscyloskopu charakterystyki tranzystora (zależności prądu kolektor-emiter I_C od napięcia kolektor-emiter U_{CE}) dla różnych wartości prądu bazy w zakresie $I_B = 0 - 70 \mu A$. Taki zakres prądów bazy I_B uzyskuje się dla napięć stałych U_b z zasilacza z zakresu ok. $0 - 20 V$. Uzyskane wykresy dla różnych wartości I_B powinny być podobne do przedstawionych na rys. 3, przedstawionym we wstępie.

- 5) Zmieniając napięcie zasilacza polaryzującego bazę tranzystora w zakresie $U_b = 0 - 20 V$, zebrać dane umożliwiające wykreślenie zależności prądu kolektora I_C w obszarze płaskim (jak na rys. 3 dla $U_{CE} > 1 V$) od prądu bazy I_B . Ze względu na duże wzmocnienie tranzystora można przyjąć, że prąd kolektora I_C jest równy prądowi w obwodzie emitera $I_E = U_{R2}/R_2$ (pomiąć prąd bazy). Wartości prądów bazy I_B odczytywać z mikroamperomierza. Między bazą i emiterem tranzystora T_1 podłączyć z użyciem chwytaków woltomierz napięcia stałego. Zmierzyć wartość napięcia stałego baza-emiter U_{BE} dla każdej użytej wartości U_b . Pomiary najwygodniej jest robić ustawiając takie wartości U_b , przy których obszar płaski charakterystyki $I_C(U_{CE})$ pokrywa się z kolejnymi działkami na ekranie oscyloskopu – w ten sposób można łatwo zebrać dane co np. $1 mA$ (lub $2.5 mA$) prądu kolektora I_C .
- 6) Wyznaczyć współczynnik wzmocnienia prądowego β tranzystora rysując zależność odczytanych z oscyloskopu wartości prądu kolektora (z obszaru płaskiego $I_C(U_{CE})$) w funkcji prądu bazy I_B - wykres zależności $I_C = f(I_B)$ z dopasowaną linią prostą. Wykonać także wykres prądu kolektora I_C w funkcji napięcia stałego U_{BE} , wykreślając prąd I_C w skali logarytmicznej. Czy otrzymany wykres $I_C(U_{BE})$ pokazuje zależność jak z rysunku 1 oraz jak dla diody z ćwiczenia C1?

Część druga - badanie własności wzmacniacza

- 7) Chcemy znaleźć optymalny punkt pracy tranzystora dla obwodu wzmacniacza o wspólnym emiterze, zasilanego napięciem $E = 10 V$, przy wartości oporu w obwodzie kolektora $R_L = 1,5 k\Omega$. Odpowiada to sytuacji, w której napięcie na kolektorze będzie równe połowie napięcia zasilania $E/2 = 5 V$. Wtedy na oporniku R_L również będzie $5 V$, a więc płynął będzie prąd $I_C = 5V/1,5 k\Omega = 3,3 mA$. Przez bazę będzie płynął prąd $I_B = I_C/\beta = 0,33 mA/\beta$. Takie warunki wstępnej polaryzacji tranzystora napięciami stałymi będą stosowane w układzie wzmacniacza, który wykonamy w drugiej części ćwiczenia.



Rys. 5. Schemat wzmacniacza o wspólnym emiterze. Wzmacniacz jest zasilany napięciem stałym $E = 10 V$. Do wejścia podłączymy sygnał sinusoidalnie zmienny z generatora o napięciu rzędu mV , zmienny sygnał wyjściowy będziemy obserwować oscyloskopem w modzie YT.

- 8) Obliczyć przewidywaną wartość oporu R_{BS} przy założeniu, że będzie on podłączony do napięcia $U_b = 10 \text{ V}$. Uwaga, w układzie na rys. 5. opór bazy składa się z dwóch oporników: $R_{BS} = R_B + R_{B1}$.
Należy skorzystać z zależności: $I_B = (E - 0,65 \text{ V})/R_{BS}$, gdzie $0,65 \text{ V}$ to przybliżona wartość napięcia na złączu baza-emiter, U_{BE} . Dokładna wartość U_{BE} dla optymalnego punktu pracy zostanie zmierzona w punkcie (11).
- 9) Zbudować wzmacniacz o wspólnym emiterze z rys. 5. Zasilanie wzmacniacza (napięcie stałe $E = 10 \text{ V}$) należy podłączyć poprzez gniazda radiowe płytki montażowej i przewody z wtyczkami bananowymi. Wejście i wyjście układu łączymy poprzez gniazda BNC z kanałami CH1 i CH2 oscyloskopu.
- 10) Podać na wejście układu wzmacniacza sygnał sinusoidalny o częstotliwości 1 kHz i amplitudzie (pik-to-pik) około 50 mV . Porównać przebiegi sygnału wejściowego i wyjściowego. Jeśli przebieg wyjściowy jest zniekształconą sinusoidą, zmniejszyć amplitudę sygnału wejściowego. Zmieniając położenie suwaka potencjometru R_{B1} zaobserwować wpływ zmian punktu pracy tranzystora na kształt przebiegu wyjściowego.
- 11) Wyłączyć sygnał 1 kHz i zmierzyć za pomocą woltomierza napięcie kolektora tranzystora. Dobrać tak wartość oporności potencjometru (opornika regulowanego) R_{B1} , aby napięcie to wynosiło $U_{CE} = E/2 = 5 \text{ V}$. W ten sposób osiąga się optymalny punkt pracy tranzystora w tym wzmacniaczu. Zmierzyc napięcie bazy U_{BE} .
Czy założenie z punktu (8), że $U_{BE} \approx 0,65 \text{ V}$ jest spełnione? (niepewność $\sigma = 0,05 \text{ V}$)
- 12) Włączyć sygnał 1 kHz . Wyznaczyć charakterystykę amplitudową wzmacniacza $U_{WY}(U_{WE})$ w całym zakresie amplitud wejściowych dających niezniekształcony sygnał wyjściowy. U_{WE} oraz U_{WY} oznaczają tutaj odpowiednio amplitudy (pik-pik) zmiennej składowej sygnału wejściowego i wyjściowego. Określić przedział amplitud U_{WE} , dla których wzmacniacz pracuje liniowo (nie zniekształca sygnału sinusoidalnego). Dla tego przedziału wyznaczyć wzmocnienie wzmacniacza K_U , dopasowując do danych doświadczalnych prostą typu $U_{WY} = K_U \cdot U_{WE}$.
- 13) Odlutować tranzystor i zmierzyć omomierzem ustawioną wartość oporu w układzie polaryzacji bazy (sumaryczną wartość oporności $R_{BS} = R_B + R_{B1}$). Porównać ją z wartością wyznaczoną w części pierwszej ćwiczenia (punkt 8).

Literatura

- 1) Wiesław Marciniak, "Przyrządy półprzewodnikowe i układy scalone", Wydawnictwa Naukowo-Techniczne
- 2) T. Stacewicz, A. Kotlicki, Elektronika w laboratorium naukowym, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1994

Wersja z dnia 22 VI 2020, K. Korona, R. Mirek, B. Piętka
(na podst. materiałów z Prac. Fiz. i Elektronicznej, WF UW)